УДК 550.831

Дубовенко Ю.І., *канд. фіз.-мат. наук, н.с.*
Інститут геофізики НАН України, Київ, dubovenko@igph.kiev.ua

ГРАВІМЕТРИЧНИЙ МОНІТОРИНГ ДЕФОРМАЦІЙ ГЕОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА МІСТ

Урбанізаційно-техногенне навантаження територій міст порушує рівноважний стан геологічного середовища, що проявляється в різноманітних динамічних явищах.

Вплив природних і техногенних факторів спричиняє *зміну* фізичних властивостей і напружено-деформованого стану геологічного середовища, характеристик геофізичних полів. Вивчення стану геологічного середовища геофізичними методами має на меті вивчення детальної будови середовища, його напружено-деформованого режиму, реакції на вплив природно-техногенних факторів.

На територіях міст високий рівень перешкод ускладнює вимірювання геофізичних полів для вивчення стану геологічного середовища. Доцільність вживання гравіметрії для вивчення цього стану диктується не лише стійкістю методу до перешкод, а і функціональною залежністю потенціалу сили тяжіння від складників вектора зсуву часток середовища при деформаціях. Ця залежність, покладена в основу тектонофізичного аналізу гравіполя за методикою [1], дозволяє обчислювати головні значення і головні напрямки тензора чистої деформації, дилатацію. В умовах міст гравіметрія є єдиним геофізичним методом, за допомогою якого можна недорого вивчати глибинну будову земної кори на основі моделювання густинних неоднорідностей за даними карт ізоаномал сили тяжіння масштабу 1:200000 в редукції Бузі.

Передумови інтерпретації такі: регіональний фон описує поліном 1-го ступеня; відоме *положення* границь тяжіючих тіл на рівні ерозійного зрізу і *густини* порід, що їх складають; тяжіючі тіла близькі один до одного чи мають спільні контакти. Методика [1] визначає таку послідовність етапів інтерпретація аномалій сили тяжіння Δg :

1. Просторовий аналіз Δg в програмі VECTOR для розділення аномалій від тяжіючих тіл і визначення ефективних глибин їх залягання та значень квазігустин дає нульове наближення моделі густинних неоднорідностей.
2. Розв'язання плоскої оберненої задачі в програмі GRPR2 для оцінки істинних глибин залягання та істинних відносних густин тяжіючих тіл дає контури густинних неоднорідностей у вертикальних перетинах – 1-ше наближення моделі густинних неоднорідностей.
3. Побудова просторової густинної моделі геологічного середовища в програмі ADG-3D дає остаточний розв'язок оберненої задачі.

Поправка цієї методики в наших умовах – в п. 1 замість програми VECTOR використовується апробований комплекс [2], в п. 2 – замість програми GRPR2 задіяно комплекс програм на основі [3].

Для візуалізації результатів інтерпретації крім плоских зображень задіяні набори тривимірних діаграм квазігустин, які якісно характеризують геологічний розріз, але для переведення ефективних глибин і квазігустин у їх істинні відповідники слід вирішувати обернену задачу.

Переваги адаптивного методу ADG-3D такі: не накопичує помилок округлень; дозволяє знаходити розв'язок, ближчий до апріорно заданого, коли задача має безліч розв'язків. Для інтерпретації прийнята просторова шарувата модель середовища з криволінійними границями розділу. Кожен шар апроксимовано паралелепіпедами, планові розміри яких задає інтерпретатор у км, а вертикальні обмежені положенням криволінійних границь. Густина у межах кожного паралелепіпеда стала. Результатом розв'язання оберненої задачі є форми тіл і глибина їх нижніх країв (умови залягання).

Основна сфера застосування гравіметрії в урбанізованих областях – моніторинг деформацій та динаміки земної кори в умовах міських агломерацій.

1. Деформації кори. Фізико-математичною основою застосування гравіметрії для вирішення цієї задачі є залежність між потенціалом сили тяжіння і компонентами вектора зсуву $\vec{S}(u,v,w)$ часток середовища при його деформації, що задаються виразами

$$u = P[(1-2\nu)\cdot C_x - C_{xzo}]W,\ v = P[(1-2\nu)C_y - C_{yzo}]W,\ w = P\left[2(1-\nu) - \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}C_{zzo}\right]W, \qquad (1)$$

де P – коефіцієнт, залежний від модулів пружності і гравітаційної сталої; ν – коефіцієнт Пуассона; W – гравітаційний потенціал ; C_x, C_y, C_{xzo}, C_{yzo}, C_{zzo} – безрозмірні функції, залежні від потенціалу. Компоненти (1) служать для обчислення компонентів *тензора чистої деформації*:

$$e_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x},\ e_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y},\ e_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z},\ e_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x},\ e_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x},\ e_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \qquad (2)$$

Метод Болотнової тектонофізичного аналізу гравіполя, збудований на цій залежності, дозволяє обчислювати головні значення і головні напрямки тензора чистої деформації, інших деформаційних характеристик.

Серед деформаційних характеристик, викликаних густинними неоднорідностями, визначаємо пружно-миттєві (строго лінійний зв'язок напруга-деформація за законом Гука у момент навантаження без урахування релаксаційних явищ плину, зрушення і т.п.) значення *тензора чистої деформації* на денній поверхні. Середовище вважаємо пружно-однорідним, для розрахунку задаємо модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона, однакові у всьому пружному півпросторі (для гранітів $4{,}6\cdot 10^9$ і 0,25). Розраховуємо компоненти тензора чистої деформації e_{xx}, e_{yy}, e_{zz}, e_{xy}, e_{xz}, e_{yz}, головні значення й головні напрямки деформацій e_1, e_2, e_3, залежні лише від властивостей деформованого тіла: це основна інформація про напружено-деформований стан середовища за даними гравіметрії. Поле деформацій завдяки диференціації геологічного середовища за густиною є істотно неоднорідним, що проявляється в просторовій зміні величини і знаку *головних значень* і орієнтації *головних осей* деформації. Кожне тяжіюче тіло залежно від знаку відносної

густини (надлишок чи дефект мас) і форми має йому властиве поле деформації.

Важлива характеристика деформації – дилатація (відносна зміна об'єму деформованого середовища ($\theta = e_1 + e_2 + e_3$)). Практично виявлено, що гранітні масиви характеризує додатна дилатація, ультраосновні – від'ємна (і значні величини модуля пружності), тому тіла з таких порід є концентраторами напруг (здатні накопичувати велику пружну енергію без руйнування).

2. Динаміка земної кори. Вторинні структурні деформаційні зміни, яких зазнала порода при метаморфізмі, приводять до зменшення її міцності. Через її невисоку міцність розрядка напруг відбувається при низькому рівні пружної енергії. Про це свідчать динамічні явища: рух денної поверхні, розриви водопровідних труб. Постійний моніторинг за допомогою повторних нівелювань у пунктах спостережень дозволяє виявити, що швидкість вертикальних рухів земної кори істотно різниться залежно від проміжку часу, протягом якого вони визначаються. Для річних інтервалів швидкість становить міліметри в рік, для інтервалів у кілька десятків років – десяті-соті частки міліметра в рік. Інверсія знаків швидкості на малих відстанях у десятки й сотні метрів свідчитиме про сильну дислокованість геологічного середовища (вертикально-блочну структуру). Відсутність довгострокової тенденції до зміни швидкості свідчитиме про рівноважний стан середовища. Додатковим індикатором блочної структури середовища є розриви водопровідних труб, більшість яких зумовлена рухом блоків по розривах і тріщинах у геологічному середовищі. Повторюваність в одному місці свідчить про сталу динаміку середовища, а густина місць аварій є мірою роздробленості середовища.

Інтерпретація аномалій сили тяжіння дає можливість установити геометрію і умови залягання джерел деформування геологічного середовища (густинни неоднорідностей), а їх тектонофізичний аналіз – характер поля деформацій. Усе разом створює передумови для успішного прогнозування стану геологічного середовища в умовах міста.

1. *Болотнова Л.А*. Эколого-геологическое изучение состояния геологической среды урбанизированных территорий: геофизический аспект / В.В. Филатов, Л.А. Болотнова // IX геофиз. чтения им. В.В. Федынского. 1-3 марта 2007 г.: тез. докл. – М., 2007. – С. 43-44; 2. *Legostaeva O.V., Starostenko V.I., Yegorova T.P.* Automatized system of 3-D gravity modelling: the main principles and software // Society Symposia, Solid Earth Geophysics & Geodesy, Annales Geophysicae, Part I, Supplement I.-1998.-V.16.-P.26; 3. *Старостенко В.И*. Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии. – К.: Наук. думка, 1978. – 228 с.

Dubovenko Y.I. **Gravimetric supervision of the urban geological media deformations.**